ظرفیت باربری پی‌ها در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار*

مریم حق‌بین [۱]

چکیده هدف از طراحی پی انتقال بار سازه به خاک زیرین بدون ایجاد گسیختگی برشی و نشست اضافی در خاک می‌باشد. بنابراین انتخاب ظرفیت باربری مناسب نکتهٔ مهمی است که در هر پروژه باید بررسی شود. در شرایط خاص پی‌ها در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار (روی شیب، بالای شیب، پایین شیب) قرار می‌گیرند و موقعیت شیب زمین بر ظرفیت باربری پی تأثیر می‌گذارد. درواقع شیب زمین بر سطح گسیختگی ایجادشده در خاک زیر پی تأثیر قابل توجه می‌گذارد و در نتیجه توجه به موقعیت پی نسبت به زمین شیب‌دار برای تعیین ظرفیت باربری دقیق پی ضروری است. در مقالهٔ حاضر، روش تحلیلی دیوار حائل مجازی براساس پایداری خاک زیر پی ارائه شده‌است. هم‌چنین، تأثیر موقعیت‌های مختلف پی نسبت به شیب زمین، فاصلهٔ پی نسبت به زمین شیب‌دار و عمق و عرض پی بر ظرفیت باربری پی بررسی شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در شرایط مختلف پی، به‌ترتیب ظرفیت باربری پی واقع بر زمین هموار و بالای شیب و پایین شیب و واقع بر شیب بزرگ‌تر می‌باشد. از قابلیت‌های رابطهٔ ارائه‌شده تعیین تأثیر زاویهٔ شیب و مسلح‌کنندهٔ زمین شیب‌دار بر ظرفیت باربری می‌باشد. ازجمله نتایج تحقیق این است که فاصلهٔ مؤثر پی از شیب که بیشتر از آن تأثیر شیب بر ظرفیت باربری از بین می‌رود، ٤/٥ برابر عرض پی است. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی ارائه‌شده توسط دیگر محققان مقایسه شد و هم‌خوانی قابل قبولی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی ظرفیت باربری پی، زمین شیب‌دار، ضریب لرزه‌ای، فاصلهٔ پی، عمق و عرض پی.

Bearing Capacity of Strip Footings in various Locations with Respect to Sloping Ground

M. Haghbin

Abstract *The purpose of footing design is transferring structure load to soil without causing shear failure and extra settlement in soil. Therefore, footing bearing capacity should be considered in various projects. In special case, footings are placed in various positions with respect to slope ground and position of ground slope affects footing bearing capacity. In fact, slope affects failure surface of soil beneath the foundation remarkably and therefore, footing location with respect to slope must be cared to determine exact footing bearing capacity. In present paper, analytical method is presented based on soil stability beneath the footing. Virtual retaining wall method is used in present study and by applying equilibrium between active and passive forces on virtual wall, footing bearing capacity on reinforced and unreinforced soils is determined in various positions with respect to slope ground. Also, varied parameters include soil resistance, footing spacing with respect to slope ground, width and depth of foundation and seismic coefficient. Results indicate, in various depths and widths of foundation, bearing capacity of footing on flat ground is more than top of slope and bearing capacity of footing top of slope is more than down of slope. Also, bearing capacity of footing on slope is minimum. Based on proposed method, footing location with respect to slope affects passive and active force on virtual retaining wall and footing bearing capacity remarkably. Also, the proposed method can determine effect of slope angle and reinforcement on footing bearing capacity. Presented method indicates effective distance from slope crest is almost 4.5B. Finally, the predicted results are compared with those reported from analytical and experimental methods performed by others, indicating an acceptable agreement.*

Key Words Footing Bearing Capacity, Slope Ground, Seismic Coefficient, Footing Spacing, Depth and Width of Footing.

---

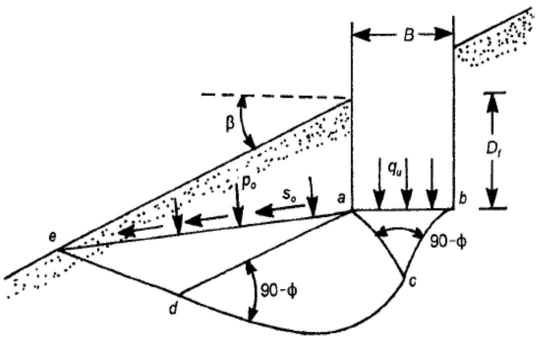
* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۲/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۳/۱۹ می‌باشد.

(۱) استادیار گروه تخصصی عمران- ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اسلامشهر.

Email: haghbin@iiau.ac.ir

مقدمه

تعیین ظرفیت باربری پی سطحی پارامتر مهمی در طراحی سازه‌ها می‌باشد و تأثیر قابل توجه بر مقاومت سازه و اقتصاد طرح می‌گذارد. هم‌چنین ساخت پی‌ها بر زمین شیب‌دار به‌دلیل قیمت زمین، حفاظت از طبیعت و دلایل بسیار دیگر اجتناب‌ناپذیر است. از طرف دیگر، تحقیقات کمی در زمینهٔ ارائهٔ رابطهٔ تحلیلی برای تعیین ظرفیت باربری پی‌ها در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین‌های شیب‌دار انجام شده‌است. ازجمله این‌که مایرهوف روشی تحلیلی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی پی واقع‌شده روی شیب ارائه داد [1,2]. در شکل (۱) ناحیهٔ پلاستیک گسترش‌یافته در خاک زیر پی با عرض B واقع بر زمین شیب‌دار نشان داده شده‌است. روش مایرهوف نشان می‌دهد که موقعیت پی‌ها نسبت به زمین شیب‌دار بر ناحیهٔ پلاستیک ایجادشدهٔ زیر پی و درنتیجه ظرفیت باربری پی تأثیر می‌گذارد.



شکل ۱ منطقهٔ گسیختگی ایجادشده زیر پی واقع بر شیب از روش مایرهوف [1,2]

هم‌چنین محققانی از قبیل هانسن، وسیک و ساران و همکاران روابط تحلیلی برای تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر بالای زمین شیب‌دار ارائه کردند [3-5]. تفاوت این روش‌ها در سطح گسیختگی فرض‌شده زیر پی می‌باشد. هم‌چنین ضرایب درنظر گرفته‌شده در این روش‌ها از قبیل ضریب شکل، عمق و شیب تجربی می‌باشد. ظرفیت باربری پی واقع بر بالای شیب از روش مایرهوف و ساران نزدیک به‌هم می‌باشند و روش هانسن نتیجهٔ کمتری را می‌دهد.

برنس بای و دیویدسون در تحقیق خود ظرفیت باربری پی در کنار سطح شیب‌دار و تأثیر ثابت بودن پی بر عملکرد آن را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ظرفیت باربری پی در کنار سطح شیب‌دار علاوه‌بر خصوصیات خاک و فاصلهٔ پی از لبهٔ شیب و زاویهٔ شیب به ثابت بودن ساختار پی (عدم حرکت افقی و یا چرخشی)، هم بستگی دارد. نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان داد که با افزایش زاویهٔ شیب ظرفیت باربری کاهش می یابد. هم‌چنین ظرفیت باربری پی در حالت آزاد کمتر از حالت گیرداری است و هرچه زاویهٔ شیب بیشتر باشد، این اختلاف کمتر است [6].

گمپرلاین و همکاران ۲۱۵ آزمایش سانتریفیوژ روی پی‌های واقع‌شده بر بالای زمین‌های شیب‌دار متشکل از خاک‌های غیرچسبنده را انجام دادند و رابطه‌ای برای تعیین ضریب $N_{\gamma q}$ ارائه کردند. این ضریب برای محاسبهٔ ظرفیت باربری پی با فواصل مختلف از تاج شیب و با ابعاد و شکل‌های مختلف به‌کار برده می‌شود [7]. گراهام و همکاران روشی تحلیلی برای تعیین فاکتور ظرفیت باربری، $N_{\gamma q}$، در پی‌های سطحی واقع بر بالای شیب متشکل از خاک دانه‌ای ارائه کردند. این روش براساس مشخصات تنش و با تمرکز بر شرایط واقعی و مرزی مدل ارائه شده‌است و درنهایت نمودارهایی برای تعیین فاکتور ظرفیت باربری به‌دست آوردند [8].

چالدهری و همکاران ظرفیت باربری لرزه‌ای پی نواری واقع بر زمین شیب‌دار را از روش تعادل حدی و شبهٔ استاتیکی بررسی کردند. در این روش سطح گسیختگی به‌صورت مرکب لوگ اسپیرال و صفحه‌ای درنظر گرفته شده‌است. ازجمله نتایجی که گرفته شده این است که افزایش شیب زمین و کاهش عمق پی، منجر به کاهش قابل توجه در فاکتورهای لرزه‌ای ظرفیت باربری پی می‌شود. هم‌چنین در مقایسه با

روش‌های دیگر نتایج نشان می‌دهد که این روش کمترین ظرفیت باربری لرزه‌ای را به‌دلیل درنظر گرفتن سطح گسیختگی بحرانی نتیجه می‌دهد [9].

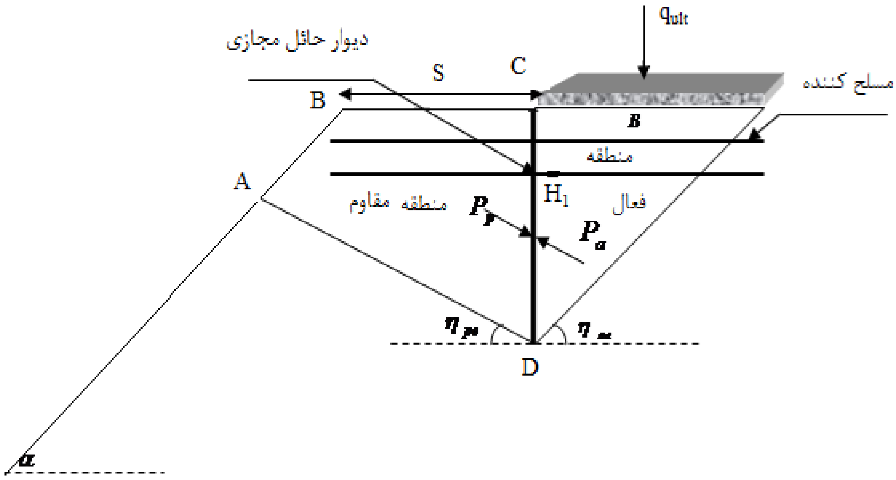
شیا و همکاران بااستفاده از روش المان محدود پایداری پی واقع بر زمین شیب‌دار متشکل از خاک چسبنده را بررسی کردند [10]، در این مطالعه، پایداری خاک زیر پی و زمین شیب‌دار با هم مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج نشان داد که مقدار بحرانی برای نسبت مقاومت $c_u / \gamma B$ وجود دارد که مرز بین گسیختگی خاک زیر پی و گسیختگی شیب می‌باشد. این نسبت بحرانی پارامتر مهمی در طراحی پی در مجاورت شیب می‌باشد.

به همین ترتیب محققانی از قبیل بوهان و همکاران، شیلد و همکاران ، سارما و همکاران ، سواف و همکاران، هوانگ و همکاران و سلوادوری و همکاران در مورد ظرفیت باربری پی واقع بر شیب تحقیقاتی انجام دادند [11-16]. هم‌چنین کستلی و همکاران با مدل‌سازی آزمایشگاهی، ظرفیت باربری شیب در موقعیت‌های مختلف را نسبت به زمین شیب‌دار تعیین و تأثیر نسبت فاصلهٔ پی از تاج شیب نسبت به عرض پی را بررسی کردند. نتیجهٔ گرفته‌شده از این تحقیق این است که با افزایش زاویهٔ اصطکاک خاک فاصلهٔ مؤثر از تاج شیب که از آن بیشتر شیب بر ظرفیت باربری تأثیر ندارد، به‌صورت قابل توجه افزایش می‌یابد [17].

معمولاً برای بررسی ظرفیت باربری در زمین‌های شیب‌دار از روابط تحلیلی ارائه‌شده توسط مایرهوف، هانسن، وسیک و ساران استفاده می‌شود، [1-5] که به‌دلیل تجربی‌بودن ضرایب، تقریب بالایی دارند و در بسیاری موارد اقتصاد طرح را تحت تأثیر قرار می‌دهند و گاهی اوقات ممکن است حاشیهٔ ایمنی مورد نیاز را تأمین نکنند. به این ترتیب نیاز به رابطهٔ تحلیلی که بدون استفاده از ضرایب تجربی اثر شیب زمین، موقعیت‌های مختلف پی نسبت به شیب و مسلح‌کننده را در انواع خاک‌ها ارائه دهد، وجود دارد. به همین دلیل در این تحقیق، روش تحلیلی ساده‌ای برای تعیین ظرفیت باربری پی واقع بر خاک مسلح و غیرمسلح در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار ارائه شده‌است. هم‌چنین، تأثیر موقعیت‌های مختلف پی نسبت به شیب زمین، فاصلهٔ پی نسبت به زمین شیب‌دار و عمق و عرض پی بر ظرفیت باربری پی بررسی می‌شود. در پایان نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی ارائه‌شده توسط دیگر محققان مقایسه می‌شود.

روش تحقیق

در این تحقیق، روش تحلیلی برای تعیین ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار ارائه شده‌است. روابط ارائه‌شده براساس پایداری خاک زیر پی می‌باشند؛ به این معنی که فرض می‌شود شیب پایدار است و مسئلهٔ لغزش وجود ندارد. روش تحلیلی به‌کار رفته دیوار حائل مجازی می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود، یک دیوار حائل فرضی در لبهٔ پی و نزدیک به تاج شیب تصور می‌شود. این دیوار فشار فعال، P_a، حاصل از بار پی و خاک زیر پی را تحمل می‌کند. از طرف دیگر خاک اطراف، در سمت چپ دیوار (ناحیهٔ شیب زمین)، در شرایط مقاوم قرار می‌گیرد و نیروی مقاوم P_p را به دیوار وارد می‌کنند. نیروهای فعال و مقاوم وارد بر دیوار مجازی از روش کولمب محاسبه می‌شوند. درنهایت با برابر قرار دادن نیروهای فعال و مقاوم وارد بر دیوار می‌توان ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار را محاسبه کرد.



شکل ۲ مکانیزم گسیختگی خاک زیر پی واقع بر زمین شیب‌دار از روش دیوار حائل مجازی

باتوجه به این‌که شیب زمین بر وزن خاک موجود در ناحیهٔ مقاوم و درنتیجه نیروی مقاوم ناشی از وزن خاک تأثیر می‌گذارد، بااستفاده از تعادل نیروهای وارد بر سطح گسیختگی مقاوم ABCD در شکل (۲) که شامل وزن سطح گسیختگی، نیروی وارد از خاک اطراف و نیروی وارد از دیوار حائل مجازی $P_{pweight}$ می‌باشد، نیروی مقاوم ناشی از وزن خاک وارد بر دیوار حائل از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود (شکل ۲):

$$P_{pweight} = \frac{\dfrac{W_1}{\cot(\eta_{pe}+\phi)}}{\dfrac{\sin\delta}{\cot(\phi+\eta_{pe})}+\cos\delta} \quad (۱)$$

که W_1: وزن خاک در ناحیهٔ مقاوم در واحد یک متر است و با محاسبهٔ مساحت چهارضلعی ABCD و ضرب در وزن مخصوص خاک به‌دست می‌آید، η_{pe}: زاویهٔ گوهٔ گسیختگی مقاوم با افق است که از روش کولمب محاسبه می‌شود و به زاویهٔ اصطکاک خاک بستگی دارد و δ: زاویهٔ نیروی $P_{pweight}$ با افق (زاویهٔ اصطکاک بین دیوار و خاک) است.

با جای‌گذاری W_1 در رابطهٔ (۵) نتیجه می‌شود:

$$P_{pweight} = \left(\frac{H_1}{2}\left(S+S+\left(\frac{H_1}{\tan\alpha}\right)\right) - \left(\frac{\dfrac{H_1\tan\eta_{pe}}{\tan\alpha}+S\tan\eta_{pe}}{1+\dfrac{\tan\eta_{pe}}{\tan\alpha}}\right)\left(S+\frac{H_1}{\tan\alpha}\right)0.5\right)\gamma/\cot(\eta_{pe}+\phi)\left(\frac{1}{\dfrac{\sin\delta}{\cot(\eta_{pe}+\phi)}+\cos\delta}\right) \quad (۲)$$

که α: زاویهٔ شیب زمین و S: فاصلهٔ پی از تاج شیب است. به این ترتیب زاویهٔ شیب زمین، فاصلهٔ پی از تاج شیب، زاویهٔ اصطکاک و وزن مخصوص خاک، بر $P_{pweight}$ و درنتیجه ظرفیت باربری پی تأثیر می‌گذارند.

به همین ترتیب نیروی فعال ناشی از وزن خاک وارد بر دیوار حائل از روش کولمب مطابق رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$P_{aweight} = \frac{1}{2}K_a\gamma H_1^2 \quad (۳)$$

در شرایطی که پی بر شیب واقع شود تأثیر شیب زمین بر نیروی فعال وارد بر دیوار هم دیده می‌شود و مشابه نیروی مقاوم، نیروی فعال هم از تعادل سطح گسیختگی فعال تعیین می‌شود.

هم‌چنین نیروی مقاوم و فعال ناشی از چسبندگی خاک بااستفاده از روش کولمب از رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$P_{acohesion} + P_{pcohesion} = cK_{pc}H_1 + cK_{ac}H_1 \quad (٤)$$

در این مرحله نیروی مقاوم افقی ناشی از سربار γD وارد بر دیوار حائل مجازی (با درنظر گرفتن پی واقع بر بالای شیب زمین) تعیین می‌شود. توجه به این نکته لازم است که شیب زمین بر نیروی افقی ناشی از سربار γD تأثیر می‌گذارد. برای محاسبهٔ نیروی مقاوم ناشی از سربار فشار ناشی از سربار γD در نسبت فاصلهٔ افقی پی تا تاج شیب (S) به کل طول ناحیهٔ مقاوم پی مورد نظر($l = \frac{H_1}{\tan \eta_{pe}}$) ضرب می‌شود (شکل ۵) و به این ترتیب با افزایش فاصلهٔ پی از تاج شیب، S تغییر کرده و تأثیر فاصلهٔ پی بر نیروی افقی ناشی از سربار دیده می‌شود. درنهایت نیروی افقی مقاوم ناشی از سربار وارد بر دیوار حائل مجازی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$P_{psurcharge} = \gamma D \frac{S}{l} K_p H_1 \quad (٥)$$

که پارامترهای S, H_1 در شکل (۵) نشان داده‌شده‌اند. ذکر این نکته لازم است که در شرایطی که پی واقع بر زمین شیب‌دار باشد، از نیروی مقاوم ناشی از عمق پی صرف‌نظر می‌شود.

در این مرحله تأثیر خاک مسلح بر ظرفیت باربری پی از روش دیوار حائل مجازی بررسی می‌شود و نیروی افقی ناشی از مسلح‌کنندهٔ خاک (وارد بر دیوار حائل مجازی) در ناحیهٔ فعال و مقاوم محاسبه می‌شود. به این ترتیب که مقاومت برشی خاک در طولی از مسلح‌کننده که در ناحیهٔ مقاوم و فعال وجود دارند، ضرب می‌شود و مجموع نیروی افقی مقاوم و فعال ناشی از مسلح‌کنندهٔ خاک مطابق رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$P_{arein} + P_{prein} = (c + \gamma H_1 \tan(\frac{2}{3}\varphi))(l_{actrein} + l_{passiverein}) \quad (٦)$$

که $l_{activerein}$: طول مسلح‌کننده در منطقهٔ فعال خاک و $l_{passiverein}$: طول مسلح‌کننده در منطقهٔ مقاوم خاک می‌باشد. به همین ترتیب نیروی فعال ناشی از بار سازه هم برابر $P_{astructure} = H_1 K_a q_{ult}$ است. درنهایت برای ایجاد تعادل دیوار حائل مجازی، نیروهای فعال و مقاوم وارد بر آن باید برابر قرار داده‌شوند، به این ترتیب ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار مطابق رابطهٔ زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{aligned} P_{astructure} + P_{acohesion} + P_{aweight} + P_{arein} &= P_{pweight} + P_{pcohesion} \\ &+ P_{psurcharge} + P_{prein} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{ult} = {} & (P_{pweight} + c(K_{pc}H_1 + K_{ac}H_1) + \\ & \gamma(1-k)(K_p D \frac{S}{l} H_1 \ - \frac{1}{2} K_a H_1^2) + \\ & (c + \gamma(1-k)H_1 \tan(\frac{2}{3}\phi))(l_{activerein} + l_{passiverein}))(\frac{1}{K_a H_1}) \end{aligned} \quad (٧)$$

که q_{ult} : ظرفیت باربری پی، $P_{pweight}$: نیروی مقاوم ناشی از وزن خاک وارد بر دیوار مجازی است که در رابطهٔ (۱) محاسبه شده‌است. لازم به ذکر است که تأثیر ضریب افقی و قائم لرزه‌ای بر ظرفیت باربری پی در ضرایب K_{pc}, K_{ac}, K_p, K_a که از روش کولمب به‌دست می‌آیند، تعیین می‌شود. هم‌چنین همان‌طور که در رابطهٔ (۷) دیده می‌شود، ضریب لرزه‌ای قائم باعث کاهش وزن مخصوص خاک می‌شود. در رابطهٔ (۷) تأثیر عرض پی در پارامتر H_1 که ارتفاع دیوار حائل مجازی و برابر $B \tan \eta_{ae}$ می‌باشد، محاسبه می‌شود و تأثیر فاصلهٔ پی از تاج شیب و شیب زمین در جملهٔ مربوط به سربار ناشی از عمق پی و $P_{pweight}$ دیده می‌شود. به‌همین ترتیب تأثیر زاویهٔ اصطکاک خاک در ضرایب K_{pc}, K_{ac}, K_p, K_a و هم‌چنین پارامتر H_1 و زاویهٔ سطوح گسیختگی مقاوم و فعال با افق و درنتیجه نیروی مقاوم $P_{pweight}$ به‌دست می‌آید. لازم به ذکر است که شیب زمین بر ضرایب K_p, K_a که از رابطهٔ کولمب به‌دست می‌آیند نیز تأثیر می‌گذارد. در تحقیق حاضر، تحلیل ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف پی نسبت به

زمین شیب‌دار بااستفاده از برنامه‌نویسی در محیط MATLAB انجام شده‌است و تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری (رابطهٔ ۷) بررسی می‌شود. درواقع از نوآوری‌های این مقاله ارائهٔ رابطهٔ کلی برای تعیین ظرفیت باربری است که به‌طور خاص تأثیر فاصلهٔ پی از تاج شیب، موقعیت پی نسبت به شیب، زاویهٔ شیب، وجود مسلح‌کننده در شیب و زیر پی و ضرایب لرزه‌ای را بررسی می‌کند. هم‌چنین در این رابطه تأثیر فاصلهٔ پی از بالای شیب بر نیروی افقی ناشی از عمق پی دیده شده‌است و از طرفی این رابطه برای هر دو نوع خاک چسبنده و غیرچسبنده قابل قبول می‌باشد.

نتایج و مباحث

در این قسمت نتایج به‌دست‌آمده از روش تحلیلی حاضر ارائه می‌شود و تأثیر موقعیت‌های مختلف پی نسبت به زمین شیب‌دار، فاصلهٔ پی نسبت به زمین شیب‌دار و عمق و عرض پی بر ظرفیت باربری پی بررسی می‌شود. در ابتدا، نتایج روش پیشنهادی با روش‌های ارائه‌شده توسط دیگر محققان مقایسه و سپس تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری پی بااستفاده از رابطهٔ (۷) بررسی می‌شود. در موارد بررسی‌شده در این تحقیق شیب زمین ۳۰ درجه درنظر گرفته شده‌است و فرض می‌شود که شیب پایدار باشد؛ به این ترتیب ظرفیت باربری پی براساس خرابی خاک زیر پی محاسبه شده‌است.

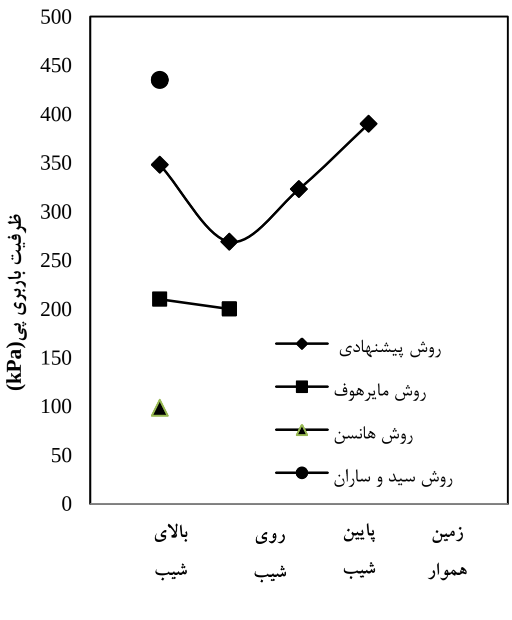
مقایسهٔ روش حاضر با روش‌های تحلیلی ارائه‌شده در گذشته

در این قسمت ظرفیت باربری پی از روش حاضر با روش‌های ارائه‌شده در گذشته در شرایط خاک غیرچسبنده مقایسه می‌شود (شکل الف- ۳). فرض می‌شود که زاویهٔ اصطکاک خاک برابر ۳۵ درجه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بااستفاده از روش حاضر وقتی پی بالای شیب قرار می‌گیرد، ظرفیت باربری از شرایطی که پی پایین شیب و روی شیب واقع شود، بیشتر می‌شود. زیرا در شرایطی که پی بر بالای شیب واقع شده‌است، نیروی فعال وارد بر دیوار مجازی (به‌دلیل کاهش وزن خاک در منطقهٔ فعال) نسبت به سایر موقعیت‌ها کمتر می‌باشد و همین عامل باعث افزایش ظرفیت باربری پی در موقعیت بالای شیب می‌شود. هم‌چنین ظرفیت باربری پی واقع بر شیب از موقعیت‌های دیگر پی نسبت به زمین شیب‌دار کمتر است. زیرا در این شرایط نسبت به موقعیت‌های دیگر نیروی فعال وارد بر دیوار مجازی افزایش و نیروی مقاوم کاهش می‌یابد و همین عامل باعث کاهش ظرفیت باربری پی واقع بر شیب می‌شود.

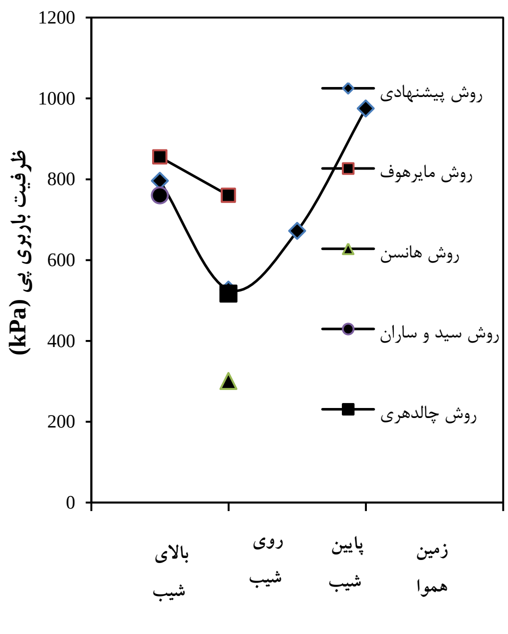
ذکر این نکته لازم است که موقعیت پی نسبت به شیب بر نیروی فعال و مقاوم وارد بر دیوار حائل تأثیر می‌گذارد و این عامل باعث تفاوت ظرفیت باربری در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین‌های شیب‌دار می‌شود. همان‌طور که در شکل (الف- ۶) دیده می‌شود، مایرهوف ظرفیت باربری پی واقع بر شیب و بالای شیب را ارائه کرده‌است [1,2]. ظرفیت باربری پی از روش تحلیلی مایرهوف بیشتر از روش‌های دیگر است. هم‌چنین ساران ظرفیت باربری پی واقع بر بالای شیب را محاسبه کرده‌است [5]، نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باربری روش ساران در مورد پی واقع بر بالای شیب نزدیک به ظرفیت باربری پی از روش حاضر است. در مورد پی واقع بر شیب نیز ظرفیت باربری از روش چالدهری به روش پیشنهادی خیلی نزدیک می‌باشد. هم‌چنین هانسن ظرفیت باربری پی واقع بر شیب را ارائه کرده‌است و همان‌طور که در شکل (الف -۳) دیده می‌شود، نتیجهٔ ارائه‌شده توسط هانسن به‌طور قابل توجهی از سایر روش‌ها کمتر می‌باشد و این نتیجه نشان

مــی‌دهــد کــه ایــن روش نســبت بــه ســایر روش‌هــا محافظه‌کارانه‌تر است. از طرف دیگر نتایج نشان می‌دهد که درکل ظرفیت باربری پی از روش پیشنهادشــده بــین ظرفیت باربری به‌دست‌آمـده از روش‌هـای دیگـر قـرار دارد.

در شکل (ب-۳) ظرفیت باربری پی واقع بر خاک چسبنده از روش پیشنهادشده با روش‌های دیگر مقایسه شده‌است. فرض می‌شـود کـه در خـاک مـورد بررسـی زاویهٔ اصطکاک برابر ۲۰ درجه و چسـبندگی برابـرkPa ۲۰ می‌باشد. نتایج نشـان مـی‌دهـد کـه در مـورد خـاک چسبنده هم، ظرفیـت بـاربری پـی از روش حاضـر بـه روش‌های دیگر نزدیک اسـت. ولـی مقایسـهٔ نتـایج در خاک چسبنده و خاک غیرچسبنده تاحدی متفاوت است و در خاک‌های چسـبنده نتـایج ظرفیـت بـاربری پـی از روش‌های مختلف نسـبت بـه خـاک‌هـای غیرچسـبنده تفاوت بیشتری دارند. همان‌طـور کـه در شـکل (ب-۳) دیده می‌شود، در شرایط پـی واقـع بـر زمـین شـیب‌دار ظرفیت باربری پی از روش ساران بیشـتر از روش‌هـای دیگـر مـی‌باشـد و ظرفیـت بـاربری روش حاضـر بـین روش‌های ساران و مایرهوف قرار می‌گیرد [1,5]. درکل، همان‌طور که در شکل‌هـای (الـف- ۳) و (ب-۳) دیـده می‌شود، روش هانسن در مـورد خـاک‌هـای چسـبنده و غیرچسبنده نسبت به روش‌های دیگر کمتـرین ظرفیـت باربری را نتیجه می‌دهد. هم‌چنین مقایسهٔ نتـایج حاصـل از روش پیشنهادشــده بــا نتــایج روش‌هــای دیگــر در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده قابل قبـول بـودن ایـن روش را نشان می‌دهد.



(ب)

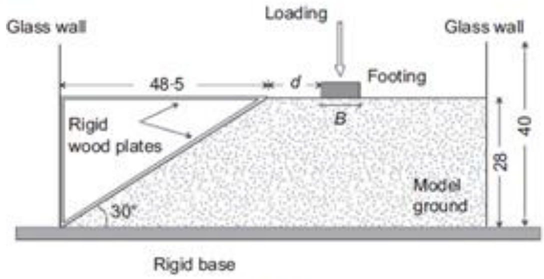


(الف)

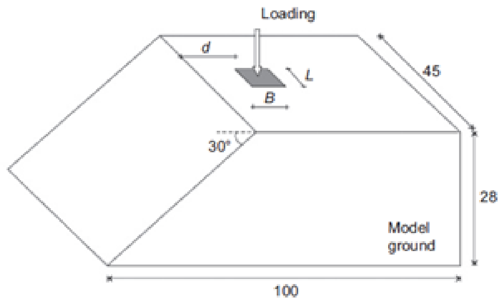
شکل ۳ مقایسهٔ روش حاضر با دیگر روش‌ها در موقعیت‌های مختلف پی نسبت به زمین شیب‌دار، الف) خاک غیرچسبنده (زاویهٔ اصطکاک خاک = ۳۵ درجه) و ب) خاک چسبنده (زاویهٔ اصطکاک خاک = ۲۰ درجه و چسبندگی = kPa۲۰)

مقایسهٔ روش تحلیلی پیشنهادی با روش‌های آزمایشگاهی و عددی ارائه‌شده در گذشته

کستلی و همکاران مدل آزمایشگاهی پی واقع بر زمین شیب‌دار را ارائه دادند و ظرفیت باربری پی را در موقعیت های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار به‌دست آوردند [17]. برای تحلیل رفتار پی‌های سطحی واقع بر شیب یک سری آزمایش بارگذاری روی مدل‌های پی مربعی و نواری واقع بر خاک ماسه‌ای انجام گرفته‌است (شکل ٤). این پی‌ها از جنس فولاد هستند و بارگذاری به‌صورت عمودی در مرکز پی انجام شده‌است. عرض پی مربعی ٦، ٨ و ١٠ سانتی‌متر و عرض پی نواری ٤ و ٦ سانتی‌متر درنظر گرفته شده‌است. در همهٔ آزمایش‌ها پی بر خاک ماسه‌ای قرار گرفته‌است.



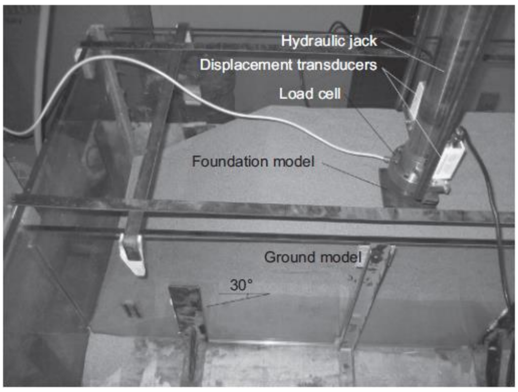
الف)



ب)

شکل ٤ مدل آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط کستلی و همکاران [17]

برای بررسی ظرفیت باربری پی‌های سطحی در مجاورت شیب، بارگذاری در جعبهٔ مکعب آزمایش که شامل ماسهٔ متراکم شده‌است، انجام می‌شود و بار عمودی استاتیکی با به‌کار بردن جک هیدرولیک بر پی ساخته‌شده وارد می‌شود. بارهای منتقل‌شده به پی مورد آزمایش، توسط ایجاد حلقه بین جک و پی به‌دقت کنترل می‌شوند. پی‌ها تا زمانی بارگذاری می‌شوند که به ظرفیت باربری نهایی برسند و گسیختگی در خاک ایجاد شود (شکل ٥).



شکل ٥ مدل واقعی بارگذاری پی واقع بر زمین شیب‌دار [17]

دانسیتهٔ خاک ماسه‌ای که در آزمایش به‌کار رفته‌است برابر ٨٧ درصد، زاویهٔ اصطکاک خاک ٣٨ درجه و وزن مخصوص آن ١٧/٥ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی، با تغییر عرض پی و فاصلهٔ آن از لبهٔ شیب در جدول (١) آورده شده‌است. همان‌طور که در جدول (١) نشان داده شده‌است، عرض پی با B، فاصلهٔ پی از شیب با S و ظرفیت باربری آزمایشگاهی با q_{ult} مشخص شده‌است.

هم‌چنین کستلی و موتتاد مدل عددی و مدل آزمایشگاهی برای به‌دست آوردن فاصلهٔ مؤثر از تاج شیب که بر ظرفیت باربری پی تأثیر می‌گذارد، ارائه کردند [18-20]. مدل تحلیل عددی بر پایهٔ تعادل حدی و مرز بالای بار حدی پی سطحی ارائه شده‌است. بیشترین کاهش ظرفیت باربری در شرایطی که پی در لبهٔ شیب قرار می‌گیرد، به‌دست می‌آید.

جدول ۱ مقایسهٔ ظرفیت باربری پی در فواصل مختلف نسبت به زمین‌های شیب‌دار به ظرفیت باربری پی واقع بر زمین هموار از سه روش (زاویهٔ اصطکاک ۴۰ درجه)

کستلی و همکاران عددی	روش تحلیلی ارائه‌شده در مطالعهٔ حاضر	کستلی و همکاران آزمایشگاهی			
$q_{ult(slope)}/q_{ult(flat)}$	$q_{ult(slope)}/q_{ult(flat)}$	$q_{ult(slope)}/q_{ult(flat)}$	B/S	S (cm)	B (cm)
۱	۰/۷۸	۰/۷۱	۰/۲۹	۱٤	٤
۱	۰/۸٦	۰/۷۷	۰/۲۲	۲۷	٦
۰/۷۵	۰/٦۱	۰/۵	۰/٤٦	۱۳	٦

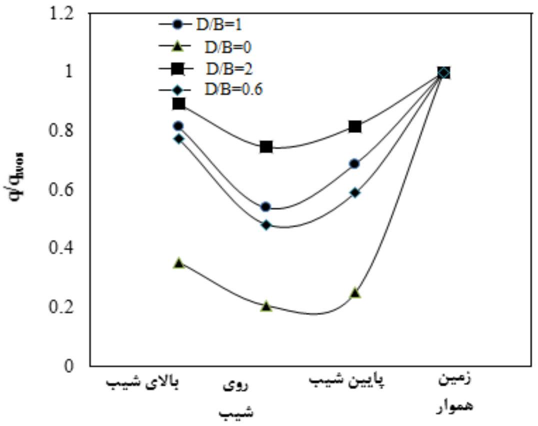
نتایج تحلیل آزمایشگاهی کستلی و همکاران نشان می‌دهد که با افزایش زاویهٔ اصطکاک، فاصلهٔ مؤثر از تاج شیب افزایش می‌یابد. هم‌چنین ازجمله نتایج دیگر این است که فاصلهٔ مؤثر به زاویهٔ شیب زمین بستگی دارد، در حالی‌که عمق پی بر این فاصلهٔ مؤثر به‌طور مشخص تأثیر نمی‌گذارد. نتایج عددی گزارش‌شده توسط کستلی و همکاران نشان می‌دهد که در صورتی که نسبت فاصلهٔ پی از شیب به عرض پی تقریباً از ۲ بیشتر شود، شیب تأثیری بر ظرفیت باربری پی نمی‌گذارد. در حالی‌که جدول (۱) نشان می‌دهد که فاصلهٔ مؤثر پی از شیب در روش تحلیلی ارائه‌شده در مطالعهٔ حاضر و روش آزمایشگاهی ارائه‌شده توسط کستلی و همکاران بیشتر از فاصلهٔ مؤثر در روش عددی کستلی و همکاران است و حدود ٤/۵ می‌شود.

مطالعات پارامتریک

در این بخش، تأثیر پارامترهای مختلف بر ظرفیت باربری پی (رابطهٔ ۷) بررسی می‌شود. باید ذکر شود که موقعیت‌های مختلف پی نسبت به سطح زمین بر وزن خاک در ناحیهٔ گسیختگی مقاوم و فعال تأثیر می‌گذارد و درنتیجه نیروی مقاوم و فعال وارد بر دیوار حائل را تغییر می‌دهد.

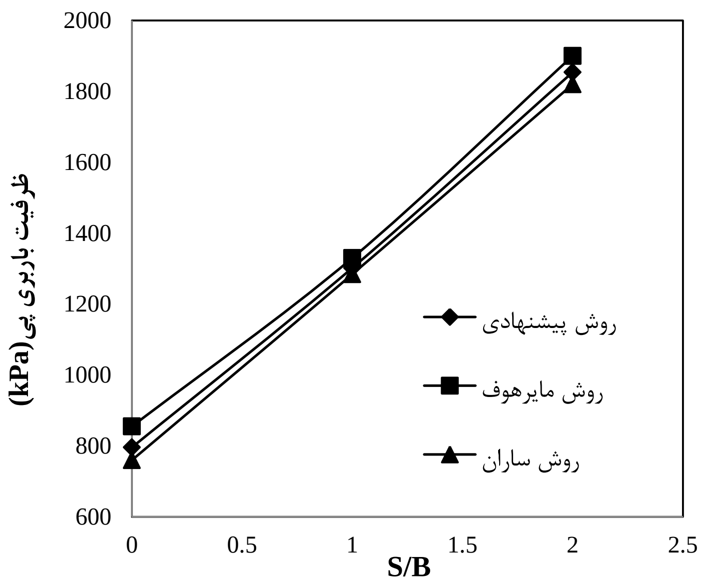
تأثیر عمق و عرض پی. در شکل (٦) تأثیر عمق و عرض پی بر ظرفیت باربری در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار نشان داده شده‌است. q/q_{wos} نشان‌دهندهٔ نسبت ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار به ظرفیت باربری پی واقع بر زمین هموار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که در عمق‌ها و عرض‌های مختلف پی، به‌ترتیب ظرفیت باربری پی واقع بر زمین هموار، بالای شیب، پایین شیب و واقع بر شیب بزرگ‌تر می‌باشد. هم‌چنین با افزایش نسبت عمق به عرض پی، تأثیر شیب زمین بر ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف آن نسبت به شیب کاهش می‌یابد. کاهش تأثیر شیب بر ظرفیت باربری پی با افزایش عمق پی در موقعیت بالا و پایین شیب بیشتر از روی شیب می‌باشد. درحقیقت، تأثیر عمق پی بر ظرفیت باربری بیشتر از شیب زمین می‌باشد؛ به‌عنوان مثال در شرایط وجود پی در بالای شیب و D/B=0 وجود شیب باعث کاهش ظرفیت باربری به میزان ٦۰ درصد می‌شود. در حالی‌که در شرایط D/B=2 مقدار کاهش تقریباً ۱۰ درصد است. با افزایش عمق پی نیروی مقاوم به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و باعث افزایش ظرفیت باربری پی و کاهش تأثیر شیب زمین می‌شود. وقتی پی روی شیب واقع شود، نیروی فعال افزایش و نیروی مقاوم کاهش می‌یابد و همین عامل باعث کاهش ظرفیت باربری پی واقع بر شیب نسبت به ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های دیگر نسبت به شیب می‌شود. هم‌چنین همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود، وقتی پی پایین شیب واقع شود، نیروی فعال و مقاوم نسبت به پی واقع

بر بالای شیب افزایش می‌یابد. افزایش نیروی فعال باعث می‌شود که ظرفیت باربری پی واقع بر پایین شیب کمتر از ظرفیت باربری پی واقع بر بالای شیب شود.



شکل ٦ تأثیر نسبت عمق به عرض پی بر ظرفیت باربری در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار در خاک‌های غیرچسبنده (زاویهٔ اصطکاک =۳۵ درجه و زاویهٔ شیب زمین =۳۰ درجه)

تأثیر فاصلهٔ پی نسبت به تاج شیب (S). در این بخش، ظرفیت باربری پی واقع بر بالای شیب از روش پیشنهادی با نتایج به‌دست‌آمده از روش مایرهوف و ساران مقایسه می‌شود (شکل ۷). نتایج نشان می‌دهد که در روش حاضر، با افزایش S (فاصلهٔ پی از تاج شیب)، وزن خاک موجود در ناحیهٔ مقاوم و درنتیجه نیروی مقاوم و ظرفیت باربری پی افزایش می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۷) دیده می‌شود، ظرفیت باربری پی از روش حاضر در فواصل مختلف پی از تاج شیب به نتایج حاصل از روش مایرهوف و ساران نزدیک می‌باشد. نمودار (۷) نشان می‌دهد که روش مایرهوف ظرفیت باربری بالاتر و روش ساران ظرفیت باربری پایین‌تر را نتیجه می‌دهد و ظرفیت باربری پی از روش حاضر بین این دو روش قرار دارد. همان‌طور که در نتایج دیده می‌شود، با افزایش S/B به ۲، ظرفیت باربری از روش پیشنهادی تقریبا ۲ برابر شده‌است. بنابراین پارامتر فاصلهٔ پی از شیب تأثیر قابل‌توجه بر ظرفیت باربری پی دارد. به این ترتیب نتایج نشان می‌دهد که روش ارائه‌شده در تحقیق حاضر برای تعیین ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار قابل قبول می‌باشد.



شکل ۷ مقایسهٔ تأثیر فاصلهٔ پی از تاج شیب بر ظرفیت باربری از روش حاضر و روش‌های تحلیلی مایرهوف و ساران [1,5]

نتایج

در مقالهٔ حاضر، روش تحلیلی دیوار حائل مجازی به منظور تعیین ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار ارائه شده و تأثیر ویژگی‌های پی (عمق و عرض پی)، فاصلهٔ پی نسبت به تاج شیب بر ظرفیت باربری پی بررسی شده‌است. درنهایت نتایج روش ارائه‌شده با روش‌های تحلیلی، آزمایشگاهی و عددی ارائه‌شده در گذشته مقایسه شده و نتایج قابل قبولی به‌دست آمده‌است. نتایج زیر از تحقیق حاضر به‌دست آورده‌شد:

۱. فاصلهٔ مؤثر پی از تاج شیب که بیشتر از آن تأثیر شیب بر ظرفیت باربری پی از بین می‌رود، از روش حاضر حدود ٤/٥ برابر عرض پی می‌باشد. هم‌چنین با افزایش نسبت فاصلهٔ پی از تاج شیب به عرض آن به ۲، ظرفیت باربری از روش پیشنهادی تقریباً ۲ برابر شده‌است.

۲. در عمق‌ها و عرض‌های مختلف پی، به‌ترتیب ظرفیت باربری پی واقع بر زمین هموار، بالای شیب، پایین شیب و واقع بر شیب بزرگ‌تر می‌باشد. براساس روش تحلیلی حاضر، موقعیت پی نسبت به زمین شیب‌دار بر نیروی مقاوم و فعال وارد بر دیوار حائل مجازی و درنتیجه ظرفیت باربری پی تأثیر می‌گذارد.

۳. با افزایش نسبت عمق به عرض پی، ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار به ظرفیت باربری پی واقع بر زمین هموار نزدیک می‌شود. این تأثیر مخصوصاً در شرایط پی واقع بر بالا و پایین شیب قابل‌توجه است.

٤. به‌طور کلی مقایسهٔ روش حاضر برای تعیین ظرفیت باربری پی در موقعیت‌های مختلف نسبت به زمین شیب‌دار با نتایج روش‌های آزمایشگاهی و تحلیلی ارائه‌شده در گذشته نشان‌دهندهٔ قابل قبول بودن این روش است.

قدردانی

بدین وسیله نویسندهٔ مقاله از دانشگاه آزاد واحد اسلامشهر به‌دلیل حمایت‌های مالی از پروژهٔ حاضر کمال تشکر و قدردانی را دارد.

مراجع

1. Meyerhof, G. G., "Some Recent Research on the Bearing Capacity of Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.1(1), pp. 16-27, (1963).
2. Meyerhof, G. G., "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Slopes", *Proceeding of IV International Conference on Soil Mech. Found.* Eng., Vol.1, London, England, pp. 384-390, (1957).
3. Hansen, J. B., "A Revised and Extended Formula for Bearing Capacity", Bulletin 28.Copenhagen, Danish Geotechnical Institute, (1970).
4. Vesic, A. S., "Bearing Capacity of Shallow Foundations", Foundation Engineering Handbook, ed. H. F. Winterkorn and H. Y. Fang, 121. New York: Van Nostrand Reinhold Co, (1975).
5. Saran, S., Sud, V.K. and Handa, S. C., "Bearing Capacity of Footings Adjacent to Slopes", *Journal of Geotechnical Engineering.*, ASCE, Vol. 115(4), pp. 553-564, (1989).
6. Bransby MF., Davidson C., "The Effect of Foundation Fixity on Their Capacity Adjacent to Slopes", *Proceedings of the BGA International Conference on Foundations*, Dundee, Scotland IHS BRE Press, (2008).

7. Gemperline, M. C., "Centrifuge Modeling of Shallow Foundations", in Proceeding ASCE Spring Convention, (1988).
8. Graham, J., Andrews. M., and Shields. D.H., "Stress Characteristics for Shallow Footings in Cohesionless Slopes", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25(2), pp. 238-245, (1988).
9. Choudhury, D and Rao, S., "Seismic Bearing Capacity of Shallow Strip Footings Embedded in Slope", *International Journal of Geomechanics*, pp. 176-184, (2006).
10. Shiau, S, Merifield, R. S , Lyamin, A. V. and Sloan, A. W., "Undrained Stability of Footings", *International Journal of Geomechanics,* pp. 381-390, (2011).
11. De Buhan, P., and Garnier, D, "Three Dimensional Bearing Capacity Analysis of a Foundation Near a Slope", *Soils Foundation Journal*, Vol. 38(3), pp. 153–16, (1998).
12. Shields, D., Chandler, N., and Garnier, J., "Bearing Capacity of Foundations in Slopes", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116(3), pp. 528–537, (1990).
13. Sawwaf., M., "Behaviour of Strip Footing on Geogrid Reinforced Sand over a Soft Clay Slope", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 25, pp. 50-60, (2007).
14. Huang C.C and Tatsuoka .F & Sato., "Failure Mechanisms of Reinforced Sand Slopes Loaded with a Footing", *Soils and Foundations Journal*, Vol. 34(2), pp. 27-40, (1994).
15. Selvadurai and Gnanendran C. T., "Bearing Capacity of Foundation Near Slopes with Multi Layers of Geosynthetic", *Indian Geotechnical Conference,* pp. 14 -16, (2006).
16. Sarma, S. and Chen, Y.C., "Seiemic Bearing Capacity of Shallow Strip Footings Near Sloping Ground", *5th conference of European Seismic Design Practice,* Research and Application, ed. Elnashai., Chester, UK, AA Balkema, Rotterdam, pp. 505-512, (1995).
17. Castelli, F. and Lentini, V., "Evaluation of the Bearing Capacity of Footings on Slopes", *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol. 12(3), pp. 112–118, (2012).
18. Castelli, F and Lentini, V., "Bearing Capacity of Shallow Foundations on Slope", Physical Modelling in Geotechnics, Balkema, Rotterdam, the Netherlands, pp. 685–690, (2010).
19. Castelli, F and Motta, E., "Bearing Capacity of Shallow Foundations Near Slopes: Static Analysis." *Foundations Proceedings of the 2nd International British Geotechnical Association Conference on Foundations, BRE Press,* Watford, UK, Vol. 1, pp. 1651–1662, (2008).
20. Castelli, F and Motta, E., "Bearing Capacity of Strip Footings Near Slopes", *Journal Geotechnical and Geological Engineering,* Vol. 28(2), pp. 187–198, (2010).